

ОПТИМИЗАЦИЯ ФОРМЫ ИНДУКТОРА ДЛЯ ПОВЕРХНОСТНОЙ ЗАКАЛКИ ВЕНЦА ЗУБЧАТОГО КОЛЕСА ТЯГОВОГО РЕДУКТОРА ТЕПЛОВОЗА

Муравьев Д.В.

Омский государственный университет путей сообщения, Омск

Ключевые слова: упрочнение, индуктор, нагрев, закалка, зубчатое колесо, сталь, теплопроводность, твердость, ресурс, оптимизация, процесс технологический.

Аннотация. Рассмотрены варианты снижения степени термического воздействия на металл венца после индукционной закалки при минимальной силе и мощности источника тока. Предложена модернизированная конструкция фасонного индуктора, повторяющего форму зубьев венца, что позволит поддерживать постоянную величину воздушного зазора в зоне «виток индуктора – деталь», повысить качество термообработки, уменьшить потери мощности на нагрев детали и снизить рабочую силу тока в индукторе.

OPTIMIZATION OF THE SHAPE OF THE INDUCTOR FOR SURFACE HARDENING OF THE GEAR RING OF THE TRACTION GEARBOX OF A DIESEL LOCOMOTIVE

Muravyov D.V.

Omsk State Transport University, Omsk

Keywords: hardening, inductor, heating, quenching, gear wheel, steel, thermal conductivity, hardness, resource, optimization, technological process.

Abstract. Options for reducing the degree of thermal effect on the metal of the crown after induction quenching with minimal current source strength and power are considered. An upgraded design of a shaped inductor repeating the shape of the teeth of the crown is proposed, which will allow maintaining a constant air gap in the "coil of the inductor – part" zone, improve the quality of heat treatment, reduce power loss for heating the part and reduce the operating current in the inductor.

Венец зубчатого колеса тягового редуктора тепловоза 2ТЭ25К^М, соединенный упругими элементами с тарелками, насаженными на ступицу упругого колеса, в процессе эксплуатации находится в зацеплении с ведущей шестерней, расположенной на валу тягового электродвигателя, и предназначен для передачи крутящего момента с якоря на колесные пары. Работоспособность ведомого зубчатого колеса во много определяется состоянием рабочих поверхностей зубьев венца, которые в эксплуатации, находясь под воздействием существенных радиальных и тангенциальных нагрузок, подвергаются интенсивному изнашиванию и разрушению, что несет угрозу безопасности движения. Дефицит смазочного материала и наличие взвешенных абразивных частиц износа лишь усугубляют ситуацию [1].

Анализ статистических данных по неисправностям зубчатых колес тепловоза 2ТЭ25К^М показал, что 48% всех дефектов приходится на образование трещин и выкрашивания по стенкам и впадинам зубьев, вызванное усталостным разрушением и изнашиванием поверхностей зубьев (рис. 1).

Продление ресурса и эксплуатационной надежности локомотива невозможно без внедрения в производство инновационных способов повышения

износостойкости и прочности материала зубчатых колес тягового редуктора за счет поверхностного упрочнения зубьев [2].

Технология упрочнения венца из стали 45ХН в соответствии с ГОСТ 30803-2014 заключается в индукционной закалке зубьев на глубину 4 ± 1 мм до твердости 48-54 HRC в цилиндрическом индукторе (рис. 2) [3, 4].

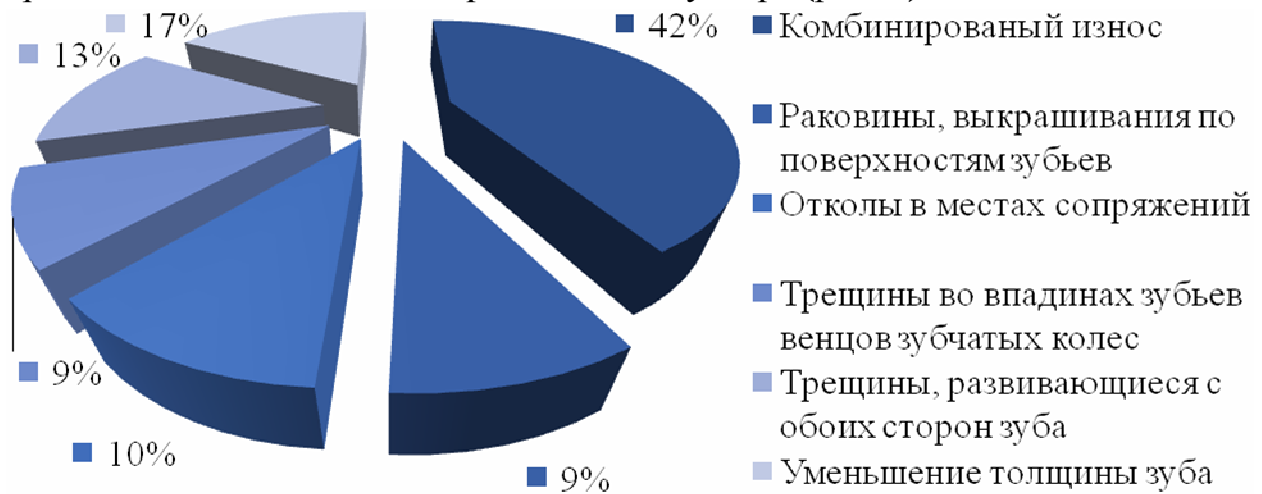


Рис. 1. Статистические данные по неисправностям зубчатых колес тепловозов 2ТЭ25К^М производства АО «Трансмашхолдинг» за 2021-2023 гг.

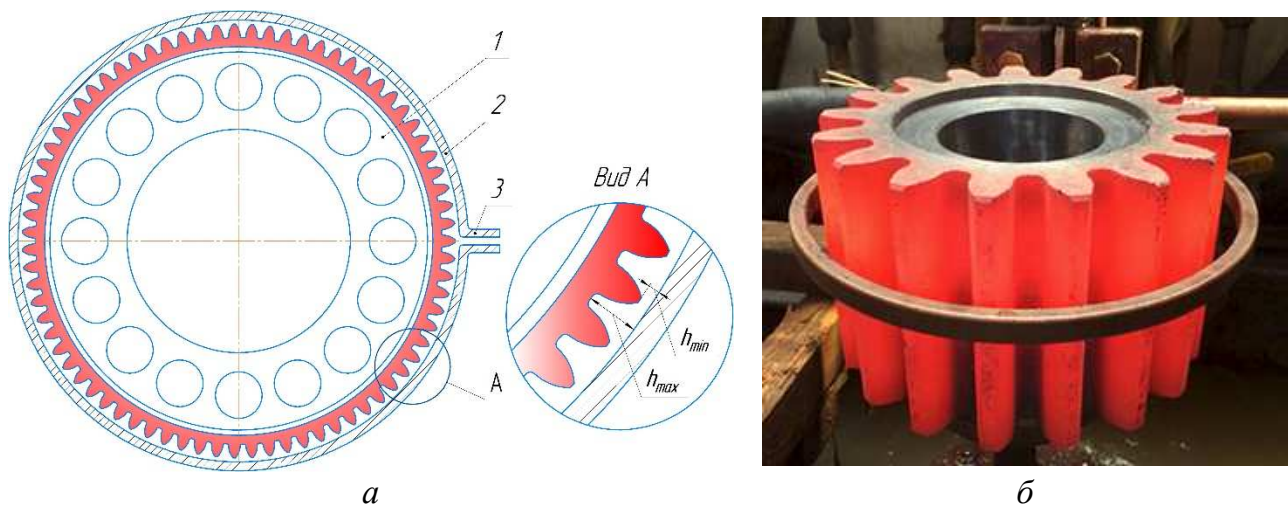


Рис. 2. Цилиндрический индуктор: а – охват витком индуктора зубчатого венца; б – пример нагрев шестерни; 1 – венец; 2 – виток; 3 – отвод для провода

Недостатком закалки в цилиндрическом индукторе является прогрев зубьев вглубь диска венца и вероятность перегрева стали, что способствует образованию крупнозернистой структуры аустенита при температуре свыше 850°C в зоне закалки и вызывает возникновение в диске колеса некачественной структуры, состоящей из сорбита и видманштеттова феррита с размером зерна, соответствующего пяти баллам, при росте закалочных структур в пределах размера крупного зерна аустенита [4]. Крупнозернистая структура обладает пониженной ударной вязкостью и усталостной прочностью, имеет низкий порог трещиностойкости, способствуя снижению работоспособности тягового редуктора тепловоза и ускоряя процессы разрушения зубчатого венца.

Устранение выявленных недостатков типовой технологии изготовления венца зубчатого колеса допустимо за счет внедрения в производство фасонного индуктора, копирующего профиль зубьев венца (рис. 3).

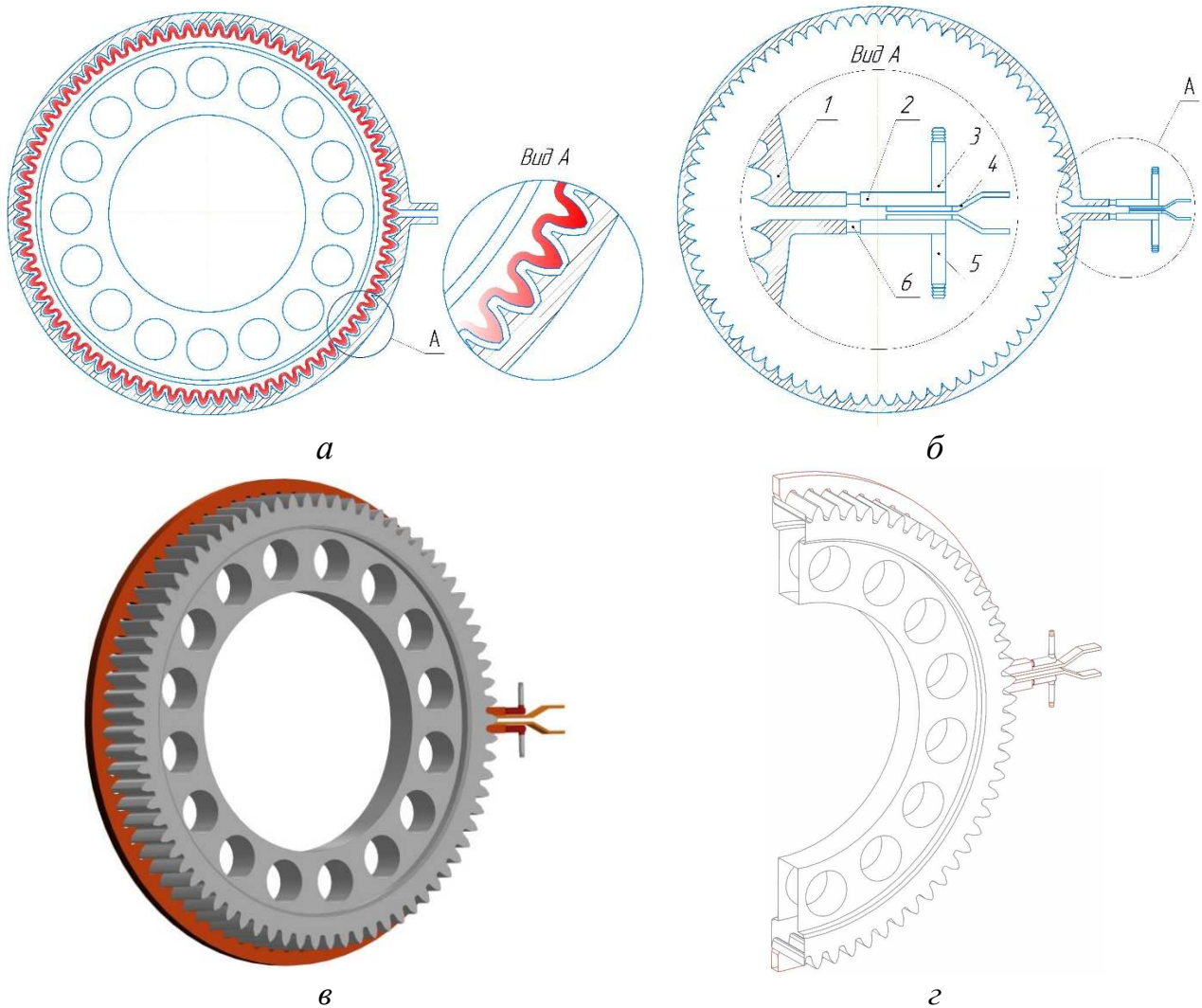


Рис. 3. Профильный индуктор для нагрева зубьев венца: а – зона термического влияния; б – конструкция индуктора; в – трехмерная модель индуктора; г – поперечное сечение индуктора; 1 – насадка индуктора; 2 – медная токоведущая трубка; 3 – впускной штуцер; 4 – клемма; 5 – выпускной штуцер; 6 – токопровод

Количество тепла, генерируемого на поверхности зубьев, определяется силой индукционного тока, которая задает температуру и скорость нагрева при закалке [5]. Особенностью предлагаемого индуктора является постоянство зазора по профилю между впадинами зубьев и витками индуктора, поэтому в работе составлены математические модели для оценки влияния воздушного зазора в индукторе на силу рабочего индукционного тока и потери мощности вихревых токов в закаливаемом слое. Предполагается, что стабильность зазора обеспечит температуру нагрева под закалку по заданной глубине при наименьшем градиенте между поверхностным слоем и центром детали.

Для подтверждения обоснованности предложенной гипотезы был проведен сравнительный анализ результатов расчета индукционного тока и потерь тепловой мощности в материале венца зубчатого колеса после нагрева в индукторах существующей и предлагаемой конструкций.

Расчет силы индукционного тока $I_{\text{и}}$ выполнен в соответствии с методикой расчета электрических параметров магнитных систем по выражению [6]:

$$I_{\text{и}} = I_{\text{и}0,3} \cdot \left(\frac{D_{\text{и}}}{D_{\text{и}0,3}} \right)^{4/3}, \quad (1)$$

где $I_{\text{и}0,3}$ – сила тока в 604,3 А, рассчитанная для базовой величины воздушного зазора h , равной 0,3 см, А; $D_{\text{и}}$ – реальный диаметр внутренней части витка индуктора, см; $D_{\text{и}0,3}$ – диаметр внутренней части витка индуктора при $h = 0,3$ см.

$$D_{\text{и}} = D_{\text{з.к.}} + h, \quad (2)$$

где $D_{\text{з.к.}}$ – диаметр венца зубчатого колеса тягового редуктора тепловоза 2ТЭ25К^М по вершинам зубьев, равный 770 мм (77 см), см.

Таким образом, по формуле (2) было рассчитано значение $D_{\text{и}0,3}$

$$D_{\text{и}0,3} = D_{\text{з.к.}} + 2h = 770 + 2 \cdot 3 = 776 \text{ мм} = 77,6 \text{ см},$$

тогда формула (1) для расчета силы индукционного тока приняла вид

$$I_{\text{и}} = 604,3 \cdot \left(\frac{77 + 2h}{77,6} \right)^{4/3} = 604,3 \cdot (0,992 + 0,0258h)^{4/3}. \quad (3)$$

Тепловая мощность в поверхностном слое зубьев венца, помещенного при закалке в переменное магнитное поле, рассчитывалась по выражению [6]:

$$P = (2,9...3,25) \cdot 10^{-4} \cdot \left(\frac{I_{\text{и}} N}{l_{\text{ср}}} \right)^{5/3} F \sqrt{f}, \quad (4)$$

где N – число витков индуктора, шт.; $l_{\text{ср}}$ – длина средней магнитной силовой линии, м, равная 1,702 м при расчете согласно рекомендациям ГОСТ 28899–91 [7]; F – общая площадь поверхности зубьев венца колеса, м², равная 0,4801 м²; f – частота индукционного тока, Гц.

Учитывая, что проектируемый индуктор является одновитковым, при подстановке выражения (3) формула (4) примет следующий вид:

$$P = 14,038 \cdot \frac{(0,992 + 0,0258h)^{2,22}}{l_{\text{ср}}^{1,67}} F \sqrt{f}. \quad (5)$$

Проведенные расчеты позволили построить зависимости силы тока индуктора $I_{\text{и}}$ и потерь тепловой мощности P на поверхности закаливаемого венца зубчатого колеса от величины воздушного зазора h в индукторе (рис. 4).

Полученные результаты позволили сделать следующие **выводы**.

1. Увеличение воздушного зазора способствует повышению требуемой мощности вихревых токов в закаливаемом слое венца зубчатого колеса тепловоза для обеспечения температуры закалки стали 45ХН в диапазоне 830-850°С, а, следовательно, и росту потерь тепловой мощности, которые, в свою очередь, возможно компенсировать за счет наращивания силы тока в индукторе. Установлено, что в результате увеличения воздушного зазора между витками кольцевого цилиндрического индуктора и поверхностью венца зубчатого колеса в зоне впадины между зубьями с 3 мм (h_{min}) до 22,5 мм (h_{max}) необходимая сила тока в индукторе повышается с 600 до 648 А или на ~7,4%, а применение фасонного индуктора позволит сократить силу индукционного тока и неоправданные потери мощности вихревых токов при закалке.

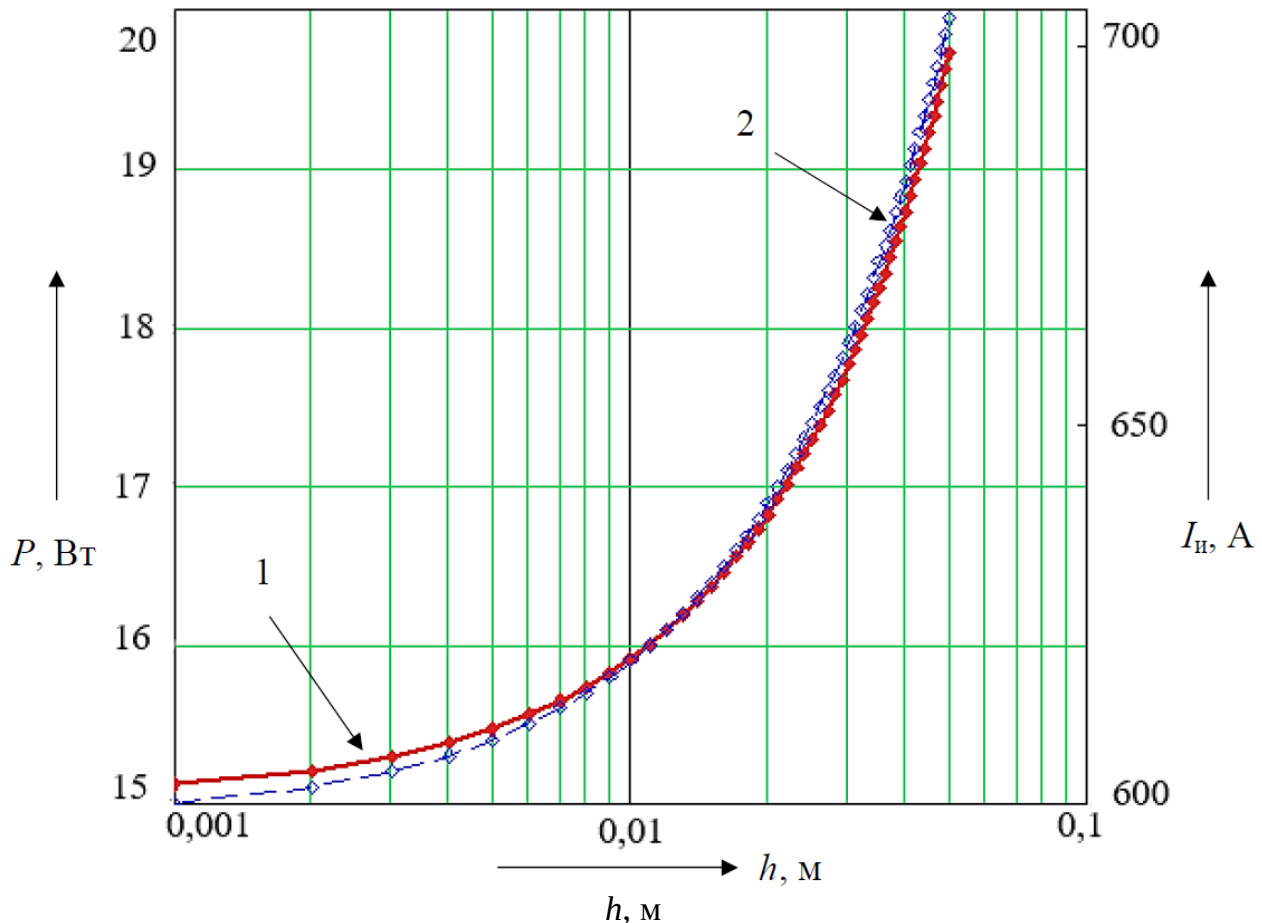


Рис. 4. Графики потерь мощности (1) и силы тока (2) при изменении зазора

2. Повышение необходимой мощности вихревых токов в поверхностных слоях при увеличении воздушного зазора в зоне «виток индуктора – деталь» приводит к интенсификации расхода электроэнергии на обеспечение проникновения тепла на глубину закалывания и, как следствие, к увеличению себестоимости изготовления венца.

3. Применение фасонного индуктора позволит поддерживать постоянную величину воздушного зазора между витками индуктора и нагреваемой поверхностью и сократить потери тепловой мощности за счет минимизации рабочей силы тока в индукторе.

4. Планируется выполнить компьютерное моделирование закалки венца в цилиндрическом и фасонном индукторе в программе COMSOL Multiphysics для оценки влияния воздушного зазора и времени выдержки детали в индукторе на температуру и скорость нагрева стали, что позволит оптимизировать величину воздушного зазора и режимы закалки.

Список литературы

1. Галимов Э.Р., Тарасенко Л.В., Унчикова М.В., Абдуллин А.Л. Материаловедение для транспортного машиностроения: учебное пособие. – СПб.: Лань, 2022. – 448 с.
2. Муравьев Д.В. Анализ способов химико-термической обработки при упрочнении зубчатых колес // Материалы третьей всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Инновационные проекты и технологии машиностроительных производств». – Омск: Омский гос. ун-т путей сообщения, 2019. – С. 20-27.
3. ГОСТ 30803-2014. Колеса зубчатые тяговых передач тягового подвижного состава. Технические условия. – М.: Стандартинформ, 2015. – 34 с.

4. ГОСТ 33189-2014. Колеса зубчатые тяговых передач тягового подвижного состава. Эталоны макро- и микроструктур. – М.: Стандартиформ, 2016. – 24 с.
5. Майсурадзе М.В., Рыжков М.А., Корниенко О.Ю., Степанов С.И. Индукционная и лазерная термическая обработка стальных изделий: учебное пособие. – Екатеринбург: Изд-во Уральского ун-та, 2022. – 92 с.
6. Корягин Ю.Д., Филатов В.И. Индукционная закалка сталей: учебное пособие. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2006. – 52 с.
7. ГОСТ 28899-91. Расчет эффективных параметров магнитных деталей. – М.: ИПК Издательство стандартов. – 2005. – 14 с.

Сведения об авторе:

Муравьев Дмитрий Валерьевич – к.т.н., доцент, доцент кафедры «Технологии транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава».